西安交通大學 研究生创新教育系列教材

多相流热物理学

陈学俊 著

西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

多相流热物理学

陈学俊　著

·西安交通大学·

内 容 提 要

本书阐述了多相流热物理学中的主要概念、科学研究与发展的思路和方法，讲解了多相流学科内在的规律和各部分间的有机联系，并运用基本知识去分析问题、认识问题和解决问题。

本书可作为能源、动力、化工、石油、核电、航空航天以及其他动力专业的研究生教材，也可作为相关专业本科生选修课程教材及有关科研单位和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多相流热物理学/陈学俊著. —西安：西安交通大学出版社，2005.12
ISBN 7-5605-2110-X

Ⅰ.多… Ⅱ.陈… Ⅲ.多相流动-热学 Ⅳ.0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 097528 号

书　　名：多相流热物理学
著　　者：陈学俊
出版发行：西安交通大学出版社
地　　址：西安市兴庆南路 25 号(邮编：710049)
电　　话：(029)82668357　82667874(发行部)
　　(029)82668315　82669096(总编办)
印　　刷：西安建筑科技大学印刷厂
字　　数：754 千字
开　　本：727 mm×960 mm　1/16
印　　张：41
版　　次：2005 年 12 月第 1 版　2005 年 12 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-5605-2110-X/TK·92
定　　价：66.00 元

版权所有　侵权必究

总　序

创新是一个民族的灵魂，也是高层次人才水平的集中体现。因此，创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节，包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段，同样，课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习，使研究生在教师指导下，获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法，对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时，开设了一批研究型课程，支持编写了一批研究型课程的教材，目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养，进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标，由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导，以本学科领域最新研究和前沿知识为内容，以探索式的教学方式为主导，适合于师生互动，使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在学习过程中可以掌握最新的科学知识，了解最新的前沿动态，激发研究生科学研究的兴趣，掌握基本的科学方法，把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式，把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材，是一项探索性的工作，有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血，但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信，通过研究型系列教材的出版与完善，必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

序

多相流热物理学是一门以流体力学、热力学、传热传质学和燃烧学为基础发展起来的新兴交叉学科。我从事多相流热物理领域内的科研和教学工作已经半个世纪，在这一领域的研究工作是从管内气液两相流的流型及其转化规律、截面含气率、摩擦阻力、对流沸腾传热、传热强化与临界热负荷，到气泡运动规律、两相流不稳定性、管束间流动与传热，再到气液两相流的界面波特性、两相及三相流中非线性分析和快速随机诊断理论、颗粒动力学及其模拟、多相流的基本建模理论与数值模拟方法等，逐步经历了一个从点到面、从工程技术原理到物理过程本质渐次深入的认识发展过程。既重视了工程技术上的应用前景，又深入到物理本质问题的研究。

希望读者能通过本书的学习，掌握多相流热物理学中的主要概念、科学研究与发展的思路和方法，了解多相流学科内在的规律和各部分间的有机联系，并运用基本知识去分析问题、认识问题和解决问题。

本书可作为能源、动力、化工、石油、核电、航空航天以及其他动力专业的研究生教材，也可作为相关专业本科生选修课程教材及有关科研单位和工程技术人员的参考书。

本书内容是本人与研究生及课题组的集体研究成果，我要感谢与我一起工作的历届博士研究生以及为本书作图的杨鸿辉研究生，还要感谢学校研究生院与科技处为出版本书的大力支持及爱妻袁旦庆教授的多次鼓励。

陈学俊

2005 年 11 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

序

第一章　两相流流型及流型转换

一、流型概述 …… (1)

二、弯管内气液两相流流型 …… (2)

三、螺旋管内气液两相流流型 …… (5)

四、螺旋管内气液两相流流型转换 …… (6)

1. 实验设备 …… (6)

2. 螺旋管流型转换的理论分析 …… (7)

3. 实验及观察结果 …… (9)

4. 螺旋管中两相流流型转换准则关系式 …… (10)

5. 结论 …… (11)

五、立式螺旋管内气液两相向下流动流型及转换 …… (12)

1. 实验设备与试验范围 …… (12)

2. 实验观察及其结果分析 …… (13)

3. 流型转换的理论模型及判别关系式. …… (14)

4. 结论 …… (16)

六、卧式螺旋管内气液两相流流型及转换 …… (17)

1. 实验设备与试验步骤 …… (18)

2. 流型分类及试验结果 …… (18)

3. 理论分析及流型转换准则关系式 …… (20)

4. 结论 …… (22)

七、卧式螺旋管内气液两相环状流转换特性 …… (23)

1. 实验设备与试验结果分析 …… (23)

2. 理论模型和转换准则关系式 …… (25)

3. 结论 …… (26)

八、螺旋管内油-水液液两相流流型 …… (27)

1. 实验系统与装置 …… (27)
2. 实验结果与流型图 …… (27)
3. 结论 …… (30)
九、卧式螺旋管内油气水三相流流型 …… (31)
1. 实验系统与装置 …… (31)
2. 实验结果与分析 …… (32)
3. 流型转变机理及转变准则式 …… (35)
4. 结论 …… (37)
十、卧式螺旋管内油气两相流流型的研究 …… (37)
1. 实验系统与装置 …… (38)
2. 实验结果与分析 …… (38)
3. 流型转变机理及转变准则式 …… (40)
4. 结论 …… (41)
十一、水平管内气液两相旋流的流型及其变化规律 …… (41)
1. 实验系统及实验方法 …… (42)
2. 实验结果及分析 …… (43)
3. 结论 …… (48)
十二、倾斜管内气液两相上升流动流型转变的研究 …… (48)
1. 试验设备 …… (48)
2. 试验结果及其分析 …… (49)
3. 流型间转变的机理与判据 …… (51)
4. 模型、试验数据与 Taitel 模型比较 …… (54)
5. 管道倾角对流型转变的影响 …… (54)
6. 结论 …… (55)
十三、管内气液两相环状流转变的机理研究 …… (56)
1. 稳定的环状流基本参数匹配关系 …… (56)
2. 环状流转变的机理 …… (57)
3. 环状流转变的联合准则 …… (60)
4. 结论 …… (63)
十四、卧式螺旋管内气液两相泡状流转变的理论预报模型 …… (63)
1. 泡状流的特征及转变机理 …… (64)
2. 泡状流转变的理论模型和预报准则 …… (65)
3. 结论 …… (67)

第二章　截面含气率
一、含气率概述 …… (68)
二、管内两相流截面含气率理论模型 …… (70)
1. 理论模型 …… (71)
2. 关系式及其比较 …… (75)
3. 结论 …… (78)
三、垂直管内两相混合物向下流动特性与截面含气率 …… (79)
1. 试验研究方法 …… (79)
2. 试验数据处理 …… (81)
3. 结论 …… (82)
四、螺旋管内截面含气率 …… (83)
1. 工作简述 …… (83)
2. 理论分析 …… (84)
3. 测量方法及试验装置 …… (86)
4. 试验结果分析 …… (90)
5. 结论 …… (92)
五、垂直下降管内气水两相流截面含气率 …… (92)
1. 试验系统及测试方法 …… (93)
2. 试验结果及讨论 …… (94)
3. 模型的建立 …… (95)
4. 模型与试验数据及其他公式比较 …… (96)
5. 结论 …… (97)

第三章　两相流动特性与流动阻力
一、管内气液两相流动摩擦阻力 …… (98)
1. 试验装置及试验方法 …… (98)
2. 试验结果及处理 …… (99)
二、螺旋管内气水两相摩擦阻力 …… (104)
1. 工作简述 …… (104)
2. 理论分析 …… (105)
3. 试验装置与试验方法 …… (106)
4. 试验结果与讨论 …… (107)
5. 结论 …… (108)
三、螺旋管内气水两相摩擦阻力特性 …… (108)

1.螺旋管内气水两相摩擦阻力特性分析 …… (110)
2.试验装置 …… (111)
3.试验结果与数据处理 …… (113)
4.结论 …… (119)
四、螺旋管内气水两相摩擦阻力随管长的变化特性 …… (120)
1.理论分析 …… (120)
2.试验装置 …… (121)
3.试验结果与分析 …… (121)
五、内螺纹管气水两相摩擦阻力特性 …… (124)
1.试验设备与试验方法 …… (124)
2.试验结果与分析 …… (126)
3.结论 …… (131)
六、管内气水两相混合物转弯阻力 …… (132)
1.管内气水两相混合物转弯流动特性准则方程 …… (132)
2.试验装置与阻力测定 …… (135)
3.试验结果与数据处理分析 …… (136)
4.结论 …… (143)
七、螺旋管内气液两相流中二次回流 …… (144)
1.数学模型及解 …… (145)
2.试验装置 …… (149)
3.试验结果与讨论 …… (151)
4.结论 …… (156)
八、分叉管两相流分配特性 …… (156)
1.试验设备及试验方法 …… (157)
2.试验结果及其整理方法 …… (158)
3.分析讨论 …… (158)
4.分叉管中流量与压降关系式的建立及比较 …… (161)
5.结论 …… (163)
九、立式螺旋管气液两相流摩擦阻力特性研究 …… (163)
1.实验系统与装置 …… (164)
2.实验结果与分析 …… (164)
3.结论 …… (166)
十、气液两相流冲刷水平管束的阻力特性研究 …… (167)
1.试验装置及方法 …… (167)

2.基本方程 …… (169)
3.试验结果及分析 …… (170)
4.结论 …… (173)

第四章　沸腾传热与传热强化
一、内螺纹管近临界压力两相沸腾传热 …… (174)
1.试验方法与试验结果分析 …… (174)
2.结论 …… (182)
二、水平管干涸后传热 …… (182)
1.试验设备 …… (183)
2.试验结果与分析 …… (183)
3.结论 …… (187)
三、螺旋管内两相强制对流沸腾和干涸后的传热 …… (188)
1.试验装置 …… (189)
2.试验结果分析 …… (189)
3.结论 …… (196)
四、稳定流动时管内强制对流沸腾的强化传热研究 …… (196)
1.试验设备 …… (197)
2.试验结果及试验数据处理 …… (198)
3.讨论 …… (202)
4.结论 …… (202)
五、表面式换热器强化传热技术的评价方法 …… (202)
1.近似的评价方法 …… (203)
2.考虑成本及运行费用的评价方法 …… (206)
3.结论 …… (207)
六、水平管束沸腾的均相循环流动模型 …… (208)
1.物理模型的建立 …… (208)
2.模型的数学描述及求解 …… (208)
3.计算实例及分析 …… (211)
4.结论 …… (212)
七、水平管束池沸腾换热机理的研究 …… (212)
1.管束池沸腾“组合模型”的数学描述 …… (213)
2.结果分析 …… (216)
3.结论 …… (218)

八、氟里昂 R－113 在水平管束管外池沸腾实验研究 …… (219)
1. 实验装置及实验方法 …… (219)
2. 结果分析 …… (220)
3. 结论 …… (223)
九、水平管束沸腾滞后的实验研究 …… (223)
1. 实验装置及实验方法 …… (224)
2. 实验结果及分析 …… (224)
3. 结论 …… (227)
十、卧式螺旋管内汽水两相流沸腾传热特性研究 …… (227)
1. 试验设备和程序 …… (228)
2. 试验结果分析 …… (228)
3. 结论 …… (232)
十一、垂直管内汽水两相下降流动和上升流动时的沸腾传热特性 … (233)
1. 设备及方法 …… (233)
2. 结果及分析 …… (234)
3. 理论分析 …… (236)
4. 结论 …… (238)
十二、亚临界及近临界压力区竖直管内沸腾传热实验研究 …… (238)
1. 试验装置方法 …… (239)
2. 实验结果及分析 …… (240)
3. 结论 …… (243)
十三、垂直下降管内高压汽水两相流动及沸腾传热特性研究 …… (244)
1. 试验装置及数据获取系统 …… (244)
2. 绝热下降流的流型及截面含气率 …… (245)
3. 沸腾下降流的流型及传热特性 …… (250)
4. 结论 …… (253)
十四、内螺纹管近临界压力区两相流沸腾传热特性的研究 …… (254)
1. 试验装置与方法 …… (254)
2. 试验结果及讨论 …… (254)
3. 结论 …… (257)

第五章　临界热负荷
一、临界热负荷值模化方法研究 …… (258)
1. 工质的热力学性质相似性 …… (259)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2. 模化方法的推导 …… (260)
3. 试验验证 …… (262)
4. 结论 …… (263)
二、水平管内的临界热负荷 …… (263)
1. 试验设备和试验方法 …… (264)
2. 理论分析 …… (264)
3. 试验结果和讨论 …… (268)
4. 结论 …… (269)
三、螺旋管内的临界热负荷 …… (270)
1. 试验装置和试验过程 …… (270)
2. 理论分析 …… (271)
3. 试验结果和讨论 …… (274)
4. 结论 …… (275)
四、水平管临界热负荷—上下温度飞升点的计算 …… (276)
1. 试验装置 …… (276)
2. 分析讨论 …… (279)
3. 结论 …… (283)
五、卧式螺旋管内烧干特性 …… (283)
1. 试验系统和方法 …… (284)
2. 结果及分析 …… (284)
3. 结论 …… (288)
六、600MW 变压运行直流锅炉水冷壁内螺纹管内壁换热特性的研究 …… (288)
1. 试验装置与方法 …… (288)
2. 垂直上升内螺纹管强化换热特性 …… (291)
3. 结论 …… (294)
七、卧式螺旋管内的沸腾临界后传热 …… (294)
1. 试验系统及方法 …… (295)
2. 试验结果及分析 …… (296)
3. 结论 …… (297)
八、垂直上升管内非牛顿流体流动沸腾的壁温工况和临界热负荷 … (298)
1. 试验系统及方法 …… (298)
2. 试验结果及分析 …… (299)
3. 结论 …… (302)

九、螺旋管内高压汽水两相流传热恶化规律的研究 …… (302)
1. 试验系统与试验方法 …… (303)
2. 壁温分布的研究 …… (305)
3. 临界干度的研究 …… (305)
4. 临界干度的预测公式 …… (307)
5. 结论 …… (308)
十、卧式螺旋管式蒸汽发生器管内沸腾传热恶化的实验研究 …… (309)
1. 实验设备和实验程序 …… (309)
2. 实验结果与分析讨论 …… (311)
3. 产生机理与关联式 …… (313)
4. 结论 …… (315)
十一、垂直下降沸腾管两相流传热恶化研究 …… (315)
1. 受热下降管的壁温特性曲线 …… (316)
2. 壁温飞升最大值 Δt_{max} 及其对应的干度 X_{max} …… (317)
3. 发生传热恶化后的最小传热系数 …… (319)
4. 结论 …… (320)
十二、卧式螺旋管蒸汽发生器快速启动时的壁温工况 …… (320)
1. 壁温瞬变的一般图景 …… (321)
2. 壁温飞升起始点及壁温最高位置 …… (323)
3. 结论 …… (324)

第六章 两相流不稳定性
一、两相流不稳定性研究工作概述 …… (325)
二、过冷度、热负荷与出口节流对压力降型脉动的影响 …… (327)
1. 实验装置 …… (328)
2. 实验范围及试验方法 …… (329)
3. 试验结果及讨论 …… (329)
4. 结论 …… (336)
三、垂直管中两相流压力降型不稳定性 …… (336)
1. 实验装置与试验方法 …… (336)
2. 试验结果 …… (337)
3. 理论分析 …… (337)
4. 数值计算与试验结果比较 …… (342)
5. 各参数对压力降型不稳定性的影响 …… (343)

6.结论 …… (344)
四、水平 U 型管中压力降型不稳定性的理论分析 …… (345)
1.控制方程 …… (345)
2.稳态流动特性的理论分析 …… (346)
3.压力降型不稳定流动特性的理论分析 …… (349)
4.结论 …… (354)
五、水平 U 型管中压力降型不稳定性的试验研究 …… (355)
1.试验系统 …… (355)
2.试验结果和讨论 …… (357)
3.结论 …… (359)
六、卧式螺旋管内汽液两相流不稳定性试验研究 …… (360)
1.试验系统及方法 …… (360)
2.试验结果分析 …… (361)
3.密度波脉动起始边界的预报 …… (364)
4.结论 …… (365)
七、蒸发管内汽液两相流不稳定性线性均相模型 …… (365)
1.模型基本思路 …… (365)
2.基本假设和数学模型建立 …… (366)
3.基本方程线性化 …… (367)
4.系统状态空间表达式 …… (370)
5.理论结果以及与试验结果的比较 …… (370)
6.结论 …… (371)
八、高温气冷堆蒸汽发生器两相流不稳定性预报 …… (372)
1.试验系统及试验方法 …… (372)
2.试验结果及讨论 …… (372)
3.积分方程无量纲化及其对试验结果的综合整理 …… (374)
4.计算结果与分析讨论 …… (375)
5.蒸汽发生器稳定性预报与讨论 …… (377)
6.结论 …… (378)
九、螺旋管内高压汽水两相流不稳定性试验研究 …… (378)
1.试验系统及试验方法 …… (379)
2.试验结果及讨论 …… (379)
3.试验结果理论分析及计算 …… (380)
4.结论 …… (382)

十、平行管内汽液两相流动不稳定性的多变量传递矩阵模型分析 …… (383)
1. 多变量传递矩阵分析 …… (383)
2. 平行通道内两相流动的稳定性分析 …… (386)
3. 数学模型 …… (387)
4. 结论 …… (388)

第七章 两相流瞬态传热、脉动及界面波特性
一、螺旋管管束流体诱发振动的实验研究 …… (389)
1. 实验模型 …… (389)
2. 测量系统 …… (390)
3. 实验结果与分析 …… (391)
4. 半经验分析 …… (393)
5. 结论 …… (395)
二、空气-水两相流压差波动研究 …… (395)
1. 实验系统 …… (396)
2. 分析方法 …… (396)
3. 实验结果与分析 …… (398)
4. 结论 …… (401)
三、氧化物燃料快堆的事故瞬态分析 …… (402)
1. 稳态校核计算 …… (402)
2. 典型事故的瞬态分析 …… (403)
3. 结论 …… (405)
四、中国试验快堆(CEFR)典型事故工况下的瞬态分析 …… (406)
1. 计算模型及分析工具简介 …… (407)
2. 失热阱时 CEFR 的瞬态特性分析 …… (407)
3. 失流时 CEFR 的瞬态特性分析 …… (408)
4. 瞬态超功率时 CEFR 的动态分析 …… (409)
5. 结论 …… (411)
五、水平管道段塞流特征参数的压差波动分析 …… (411)
1. 段塞流压力与压差波动特性 …… (412)
2. 段塞流特征参数的分析方法 …… (413)
3. 试验系统 …… (414)
4. 试验结果分析 …… (414)
5. 结论 …… (416)

六、通球清管过程中微起伏管内的段塞流特性试验研究 …… (417)
1. 试验装置与试验方法 …… (417)
2. 通球清管过程中压力与流量的波动特性 …… (419)
3. 通球清管过程中管道内各点间的压差变化 …… (420)
4. 清管运动的速度与压降 …… (421)
5. 结论 …… (423)
七、空气水两相流压力波动现象非线性分析 …… (423)
1. 压力波动机理分析 …… (424)
2. 确定混沌系统的性质及参数 …… (424)
3. 实验系统及流型观察 …… (425)
4. 实验结果与分析 …… (425)
5. 结论 …… (427)
八、倾斜方管内气液两相分层流界面的稳定性分析 …… (427)
1. 数学模型 …… (428)
2. 界面波色散方程的导出与稳定性分析 …… (429)
3. 色散方程的求解 …… (430)
九、方管内气液两相流界面波统计特性分析 …… (434)
1. 实验系统及测试方法 …… (434)
2. 实验结果及分析 …… (434)
3. 结论 …… (437)
十、气液两相流界面波非线性稳定性分析研究 …… (439)
1. 非线性方程组及其特征线方程的导出 …… (439)
2. 特征线方程组差分格式的推导 …… (441)
3. 计算方法及步骤 …… (442)
4. 计算结果与分析 …… (443)
5. 结论 …… (446)
十一、垂直管内气液两相逆向流动中界面波特性及液泛现象研究 … (446)
1. 实验装置及测试方法 …… (446)
2. 实验结果 …… (447)
3. 结论 …… (451)
十二、卧式螺旋管压力降脉动瞬态及时均传热特性研究 …… (452)
1. 试验段及热电偶布置 …… (452)
2. 结果及讨论 …… (453)
3. 结论 …… (458)

十三、卧式螺旋管汽液两相压力降脉动试验研究 …… (458)
1. 试验系统和方法 …… (459)
2. 试验结果及分析 …… (459)
3. 结论 …… (465)

第八章　两相流测试
一、孔板测量高压汽水混合物流量与干度 …… (466)
1. 理论分析和推导 …… (467)
2. 试验系统及测量方法 …… (469)
3. 试验结果及讨论 …… (470)
4. 结论 …… (473)
二、用锐缘孔板对亚临界压力两相流测量 …… (473)
1. 理论分析 …… (474)
2. 试验装置 …… (475)
3. 试验结果及讨论 …… (476)
4. 结论 …… (478)
三、用电导法测定两相流平均截面含气率 …… (478)
1. 试验装置和测量原理 …… (479)
2. 试验结果 …… (480)
3. 结论 …… (482)
四、气液两相弹状流动中气弹及其尾流气泡参数的瞬态测量 …… (482)
1. 测量原理及方法 …… (482)
2. 实验测量结果及分析 …… (484)
3. 结论 …… (487)
五、气液两相流界面波的双平行电导探针测量方法研究 …… (487)
1. 测量原理 …… (488)
2. 探针设计及探针输出信号的采集 …… (489)
3. 水平管内气液两相分层流液膜的测量 …… (493)
4. 结论 …… (494)
六、油气水三相流截面相份额光纤探针/电导探针组合测量技术 …… (494)
1. 测量原理与试验装置 …… (495)
2. 测量结果及分析 …… (498)
3. 结论 …… (499)
七、列管式余热锅炉内垂直管束的截面含气率测量 …… (499)

需要全本请访问 www.ertongbook.com